

## ОГНЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ МОДЕЛИ ПРЯМОТОЧНОГО ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ДЕТОНАЦИОННЫМ ГОРЕНИЕМ ВОДОРОДА В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ ПРИ ЧИСЛАХ МАХА ОТ 5 ДО 8\*

С. М. Фролов<sup>1</sup>, В. И. Звегинцев<sup>2</sup>, В. С. Иванов<sup>3</sup>, В. С. Аксёнов<sup>4</sup>, И. О. Шамшин<sup>5</sup>, Д. А. Внучков<sup>6</sup>, Д. Г. Наливайченко<sup>7</sup>, А. А. Берлин<sup>8</sup>, В. М. Фомин<sup>9</sup>

**Аннотация:** Приведено описание огневых испытаний модели прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД) длиной 1,05 м и диаметром 0,31 м с расширяющейся кольцевой камерой сгорания (КС), работающей на детонационном горении водорода, в импульсной аэродинамической трубе при числах Маха набегающего воздушного потока от 5 до 8 при температуре торможения 300 К. Зарегистрированы непрерывно-детонационный и продольно-пульсирующий режимы горения водорода с характерными частотами 1250 и 900 Гц соответственно. Максимальные измеренные значения удельного импульса (по топливу) и тяги двигателя составили 3600 с и 2200 Н.

**Ключевые слова:** прямоточный воздушно-реактивный двигатель; сверхзвуковое течение; детонация; водород; удельный импульс; тяга; аэродинамическая труба

### Литература

1. Зельдович Я. Б. Об энергетическом использовании детонационного горения // ЖТФ, 1940. Т. 10. № 17. С. 1453–1461.
2. Фролов С. М., Аксенов В. С., Гусев П. А., Иванов В. С., Медведев С. Н., Шамшин И. О. Экспериментальное доказательство энергоэффективности термодинамического цикла Зельдовича // Докл. РАН, 2014. Т. 459. № 6. С. 711–716.
3. Frolov S. M., Aksenov V. S., Ivanov V. S. Experimental proof of Zel'dovich cycle efficiency gain over cycle with constant pressure combustion for hydrogen–oxygen fuel mixture // Int. J. Hydrogen Energ., 2015. Vol. 40. No. 21. P. 6970–6975.
4. Фролов С. М., Аксенов В. С., Иванов В. С., Шамшин И. О. Тяговые характеристики импульсно-детонационно-
5. Kailasanath K. Recent developments in the research on pulse detonation engines // AIAA J., 2003. Vol. 41. P. 145–159.
6. Roy G. D., Frolov S. M., Borisov A. A., et al. Pulse detonation propulsion: Challenges, current status, and future perspective // Prog. Energ. Combust., 2004. Vol. 30. No. 6. P. 545–672.
7. Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 423 с.
8. Wolanski P. Detonation propulsion // Proc. Combust. Inst., 2013. Vol. 34. P. 125–158.
9. Kasahara J., Frolov S. Present status of pulse and rotating detonation engine research // 25th ICDERS Proceed-

\*Работа частично выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума Российской академии наук «Горение и взрыв» и в рамках проекта Российского научного фонда 14-13-00082П.

<sup>1</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», smfrol@chph.ras.ru

<sup>2</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, zvegin@itam.nsc.ru

<sup>3</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, ivanov.vls@gmail.com

<sup>4</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; v.aksenov@mail.ru

<sup>5</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; igor\_shamshin@mail.ru

<sup>6</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, vnuchkov@itam.nsc.ru

<sup>7</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, denis@itam.nsc.ru

<sup>8</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, berlin@chph.ras.ru

<sup>9</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, fomin@itam.nsc.ru

- ings. — Leeds, 2015. Paper No. 304.
10. Фролов С. М., Аксёнов В. С., Дубровский А. В., Иванов В. С., Шамшин И. О. Энергоэффективность непрерывно-детонационных камер сгорания // Физика горения и взрыва, 2015. Т. 51. № 2. С. 102–117.
  11. Frolov S. M., Aksenov V. S., Ivanov V. S., et al. Large-scale hydrogen–air continuous detonation combustor // Int. J. Hydrogen Energ., 2015. Vol. 40. P. 1616–1623.
  12. Lin W., Zhou J., Liu S., et al. Experimental study on propagation mode of H<sub>2</sub>/air continuously rotating detonation wave // Int. J. Hydrogen Energ., 2015. Vol. 40. P. 1980–1993.
  13. Anand V., St. George A., Driscoll R., et al. Investigation of rotating detonation combustor operation with H<sub>2</sub>–air mixtures // Int. J. Hydrogen Energ., 2015. Vol. 41. No. 2. P. 1281–1292.
  14. Wang C., Liu W., Liu S., et al. Experimental investigation on detonation combustion patterns of hydrogen/vitiated air with annular combustor // Exp. Therm. Fluid Sci., 2015. Vol. 66. P. 269–278.
  15. Fotia M. L., Schauer F., Kaemming T., et al. Experimental study of the performance of a rotating detonation engine with nozzle // J. Propul. Power, 2016. Vol. 32. P. 674–681.
  16. Ждан С. А., Рыбников А. И. Непрерывная детонация в сверхзвуковом потоке водородокислородной смеси // Физика горения и взрыва, 2014. Т. 50. № 5. С. 63–74.
  17. Liu S., Liu W., Jiang L., Lin Z. Numerical investigation on the airbreathing continuous rotating detonation engine // 25th ICDERS Proceedings. — Leeds, 2015. Paper No. 157.
  18. Дубровский А. В., Иванов В. С., Зангиев А. Э., Фролов С. М. Трёхмерное численное моделирование характеристик прямооточной воздушно-реактивной силовой установки с непрерывно-детонационной камерой сгорания в условиях сверхзвукового полета // Хим. физика, 2016. Т. 35. № 6. С. 49–63.
  19. Wang C., Liu W., Liu S., et al. Propagation characteristics of continuous rotating detonation wave under different temperature air // 25th ICDERS Proceedings. — Leeds, 2015. Paper No. 154.
  20. Фролов С. М., Звезгинцев В. И., Иванов В. С. и др. Макет-демонстратор непрерывно-детонационного прямооточного воздушно-реактивного двигателя. Результаты испытаний в аэродинамической трубе // Докл. РАН, 2017. Т. 474. № 1. С. 51–55.
  21. Звезгинцев В. И. Газодинамические установки кратковременного действия. Ч. 1. Установки для научных исследований. — Новосибирск: Изд-во Параллель, 2014. 551 с.
  22. Фролов С. М., Аксёнов В. С., Дубровский А. В. и др. Хемионизационная и акустическая диагностика рабочего процесса в непрерывно-детонационных и импульсно-детонационных камерах сгорания // Докл. РАН, 2015. Т. 465. № 1. С. 62–67.

Поступила в редакцию 19.06.17